

부하변동에 의한 지중유효열전도도와 보어홀 전열저항 해석

노정근*, 연광석**, 송헌***

*충북대학교 기계공학부(jeonguen@chungbuk.ac.kr), **충북대학교 바이오시스템공학과(ksyon@cbnu.ac.kr),
***홍익대학교 건축학과(archilieu@hotmail.com)

Analysis of Effective Soil Thermal Conductivities and Borehole Thermal Resistances with a Power Supply Regulation

Ro, Jeong-Geun* Yon, Kwang-seok** Song, Heon***

*School of Mechanical Eng., Chungbuk National University(jeonguen@chungbuk.ac.kr)
**Dept. of Biosystem Eng., Chungbuk National University(ksyon@cbnu.ac.kr)
***Dept. of Architecture, Hong-Ik University(archilieu@hotmail.com)

Abstract

Investigation of the effective soil thermal conductivity(k) is the first step in designing the ground loop heat exchanger(borehole) of a geothermal heat pump system. Another important factor is the borehole thermal resistance(R_b). Thermal response tests offer a good method to determine the ground thermal properties for the total heat transport in the ground. This is done by supplying a constant heat power into a borehole heat exchanger. There are two methods to supply a constant heat power. One is to employ the electricity provided by Korea Electric Power Corporation(KEPCO). The other is to use electricity generated by a generator. In this study, the power supply regulation was found to reduce when the electricity generated by the generator was used. This is because the generator evaluated with the power supply characteristically reduces the power supply regulation between an overload and a complex using. But it sometimes occurs a power supply regulation in In-situ thermal response test. In this case getting of k , R_b requires delay times and restored normal state. However, the effect of the delay times and restored normal state on the soil thermal conductivity and borehole thermal resistance is very small. Therefore it is possible to use a generally accepted delay times and restored normal state in the analysis. In this work, it is also shown that an acceptable range of Δk , ΔR_b for normal state and regulation state might be approximately $0.01-0.16 W/m.k$, and $-0.004-0.007 m.K/W$, respectively. Thus, restored normal state of power supply regulation is valuable to recommend.

Keywords : 지열원 열펌프시스템(Geothermal Heat Pump System), 열응답시험(Thermal Response Test), 수직 밀폐형 지중열교환기(Borehole), 지중유효열전도도(Effective Soil Thermal Conductivity), 보어홀 전열저항(Borehole Thermal Resistance), 부하변동(Power Supply Regulation)

투고일자 : 2011년 7월 14일, 심사일자 : 2011년 7월 17일, 게재확정일자 : 2011년 8월 11일
교신저자 : 연광석(ksyon@cbnu.ac.kr)

1. 서 론

수직밀폐형 지중열 교환기(보어홀)의 지중 유효열전도도 측정에 관한 사항은 지식경제부 신재생에너지 설비의 지원 설치에 관한 기준11)에서 측정 관련 사항을 규정하고 있다. 이 지침서에 의하면 지중유효열전도도의 측정은 히터전원 투입 후 48시간 연속 측정하여 데이터를 10분 이하의 간격으로 수집하도록 규정 되어 있다.

이 측정 기술로 Adam Austin²⁾은 현지 지열 측정 시스템에 대한 개발을 1995년에 제시하였으며, 이에 대한 연구는 Signhild Geglín & Bo Nordell³⁾의 지열 응답시험이 있고, Mattsson과 Gilbert⁷⁾에 의한 현지 지열 응답시험 등의 연구가 있다. 국내에서는 우 등에 의한 현지 지중열전도도 측정기술에 대한 보고서(2008년)⁹⁾가 있고, 이 등에 의한 지중유효열전도도를 해석에 사용되는 선형 열원 모델의 초기 제외 시간 결정에 관한 연구(2008년)⁸⁾와, 2010년 선형 열원법에 의한 지중유효열전도도와 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구¹⁰⁾가 있다. 이와 같이 보어홀에 대해 해석 및 전열저항에 관한 연구¹¹⁾는 많으나 공급 열원의 영향에 관한 연구는 전무한 실정이다.

현지 지중 유효 열전도도의 측정 기술⁴⁾⁵⁾은 히터 전원을 50 W/m~80 W/m 범위 내에서 공급하도록 규정¹¹⁾되어 있어 일반적으로 150 m 깊이의 수직밀폐형 지중열교환기에 대해 측정하고자 할 때 최소 7.5 kW에서 최대 12 kW의 전력 공급을 필요로 한다.

그러므로 현지에서 지중 유효 열전도도에 관한 측정을 하고자 할 때 전력 12 kW이상, 전류 50A 이상의 안정적인 전원공급 장치가 선결 과제로 요구된다. 하지만 여러 가지 원인에 의해 전원 공급의 문제가 종종 발생한다. 공급 전원의 문제로는 한전 전기(KEPCO)를 사용할 경우 다양한 공사와 맞물리면서 부하의 변동이 심하고 과부하에 의한 차단기작동

으로 전원이 일시적으로 중단되는 현상이 발생한다. 발전기를 사용 할 경우 발전기의 상태에 따라 장시간 연속으로 사용 할 경우 갑작스런 부하 변동과 일시적인 정전 상태 등이 발생하는 경우가 종종 있다. 이러한 경우 재측정을 하기 위해서는 지중 초기온도의 0.3℃ 이내까지 회복된 후 재측정을 실시하도록 규정¹¹⁾하고 있다. 규정에 따라 새로 시작하기 위해서는 장시간의 회복 시간으로 인하여 공기의 지연 등이 초래되고, 인적, 물적으로 많은 피해가 발생하고 있다.

그러므로 본 연구에서는 시험용 보어홀의 열응답 시험 시 일시적인 정전 또는 부하변동으로 발생 할 수 있는 영향을 분석하여 시간 단축과 인적, 물적 피해를 최소화 시킬 수 있는 방안을 제시하고 지중유효열전도도, k 및 전열저항, R_b 에 미치는 특성을 규명하고자 한다.

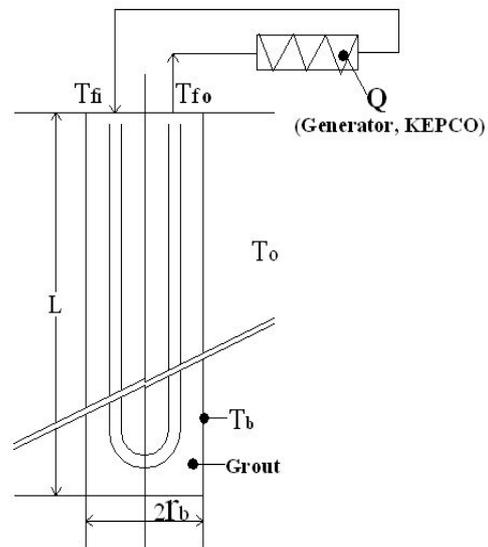


그림 1. 열응답 시험중인 보어홀

2. 선형열원법

보어홀은 그림 1에서 보이는 바와 같이 반경 r_b 와 수직길이 L , 그리고 보어홀 내부에

투입된 U-관으로 이루어지며 보어홀 내부 공간은 그라우팅 처리된다. U-관 내부를 흐르는 보어홀 유체의 입·출구 온도차는 3.5~7℃ 범위 내에서 유량을 조절하도록 규정(11)하고 있다. 보어홀 유체 온도(T_f)는 입구온도(T_{fi})와 출구온도(T_{fo})를 평균하여 사용한다.

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (1)$$

일정열량 Q 가 발생되는 전기히터를 연결하고, 초기온도 T_o 인 균일한 무한 매질속에 매설되어 있는 경우 선형열원 모델은 Carslaw와 Jaeger¹²⁾에 의하여 다음과 같은 근사식으로 표현될 수 있다.

$$T_o - T(r,t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (2)$$

여기서 $T(r,t)$ 는 시간 t 에서 열원으로부터 거리 r 에 있는 매질의 온도이며 $\alpha (=k/\rho c)$ 는 매질의 열확산율이고 ρ 와 c 는 각각 매질의 밀도와 비열을 나타낸다. 식 (2)로부터 $r = r_b$ 인 보어홀 벽면온도 T_b 를 구하면

$$T_b = T_o - \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

보어홀 전열저항 R_b 는 벽면온도 T_b 와 보어홀 유체온도 T_f 사이에서 다음과 같이 정의한다.

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 결합하면 T_f 에 관한식이 다음과 같이 성립된다.

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (5)$$

식 (5)는 T_f 와 $\ln t$ 에 관한 1차식이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_f = bx + c \quad (6)$$

식 (6)에서

$$b = \frac{Q/L}{4\pi k} \quad (7)$$

$$x = \ln t \quad (8)$$

$$c = b \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (9)$$

지중열전도도 k 는 식 (7)로부터 구하게 된다.

$$k = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (10)$$

보어홀 전열저항 R_b 는 식 (9)로부터 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$R_b = \frac{L}{Q} \left[c - b \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) - T_o \right] \quad (11)$$

3. 열응답 시험 및 해석

표 1은 본 연구에 사용된 시험용 보어홀의 사양이다. 이 표에서 보면 보어홀 길이는 145.1 m~154.9 m 를 사용하였고 초기온도는 15.3℃~16.1℃ 사이의 분포를 나타내었다. 하지만 최종 보어홀 유체 평균온도는 31.3℃~37.1℃로 지역에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 그라우트의 벤토나이트와 물의 비율은 작업자에게 의뢰하여 확인 하였을 뿐 정확한 비율을 측정하지는 못하였다. 하지만 벤토나이트는 동일사의 제품을 사용한 것으로 확인 하였다.

표 1. 시험용 보어홀 사양

구분	담양	안성	광진구	나주시
형식	단일 U-관식 U pipe 규격: 30A사용	단일 U-관식 U pipe 규격: 30A사용	단일 U-관식 U pipe 규격: 30A사용	단일 U-관식 U pipe 규격: 30A사용
보어홀 직경	0.15 m	0.15 m	0.15 m	0.15 m
보어홀 길이	154.3 m	154.9 m	145.1 m	151.7 m
그라우트	Bentonite : Water = 1: 5 열전도도 : 0.7 W/m · K	Bentonite : Water = 1: 5 열전도도 : 0.7 W/m · K	Bentonite : Water = 1: 5 열전도도 : 0.7 W/m · K	Bentonite : Water = 1: 5 열전도도 : 0.7 W/m · K
초기온도	15.4 °C	15.8 °C	15.3 °C	16.1 °C
총료 시험시간	52h 40min	53h 12min	53h 14min	52h 18min

표 2에서는 각각의 시험용 보어홀에서 열응답시험시 갑작스러운 부하 변동이 발생한 시점과 부하변동이 종료된 시점에서의 온도와 시간을 나타내었으며, 또한 부하변동 발생 직전의 온도까지 회복되는데 걸린 시간을 나타내었다.

이 결과를 볼 때 보어홀 유체 평균 온도가 29 °C 이상에서 부하변동이 발생 할 경우 부하변동 직전의 온도까지 회복 하는데 소요되는 시간은 부하변동이 지속 되었던 시간과 무관하게 4시간 이상 소요되는 것으로 나타났다. 열응답 시험에서 부하의 변동이 발생하였을 경우 지중 초기온도의 0.3°C 이내까지 회복된 후에 재시험을 하여야 함은 잘 알려져 있는 사실이나 이와 같이 부하변동이 발생하였을 경우 지중 초기온도까지 회복하지 않고 열응답 시험을 하는 방안에 대해서는 알려진 것이 없다. 그러므로 이 실험에서는 부하변동 바로직전 온도까지 회복시킨 후 부하변동 발생으로부터 회복까지 시간을 제외하고 전체 48시간 이상

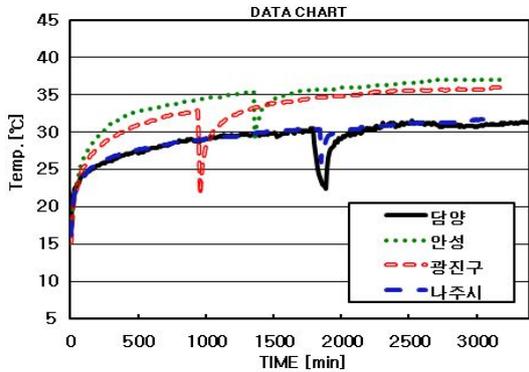
이 되도록 연장하여 측정하였을 때 이에 따른 분석 결과를 나타낸 것이다.

표 2. 부하변동 발생 현황

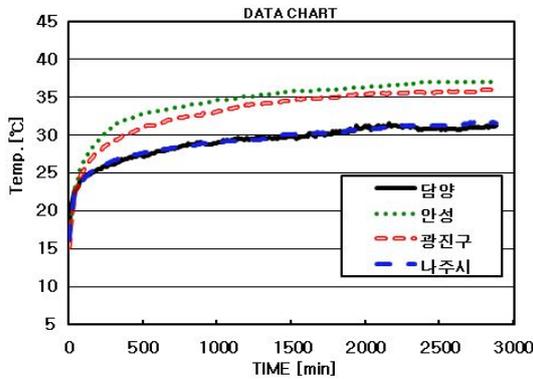
구분	담양	안성	광진구	나주시	
부하변동 시작시점	30h	23h 55 min	13h 44min	31h 25min	
부하변동 종료시점	31h 30min	24h 5min	17h 1 min	31h 27 min	
부하변동 시간	1h 30min	10 min	3 h 17min	2 min	
부하변동 직전 온도까지 회복 시간	4h 30 min	5h 12min	5h 14 min	4h 18 min	
부하변동 발생 보어홀 유체 온도	입구 온도	32.1 °C	37.7 °C	34.8 °C	32.6 °C
	입출구 평균 온도	30.1 °C	34.4 °C	29.0 °C	29.5 °C
부하변동 종료 보어홀 유체 온도	입구 온도	22.3 °C	33.1 °C	30.9 °C	28.3 °C
	입출구 평균 온도	22.1 °C	29.9°C	25.2 °C	25.8 °C
최종 보어홀 유체 온도	입구 온도	33.4°C	39.2°C	38.3°C	33.8°C
	평균 온도	31.3 °C	37.1 °C	36.1 °C	31.6 °C

그림 2에서는 표 2의 시험결과에서 부하 변동의 영향을 받은 부분(a 그림), 부하변동의 영향을 받은 만큼의 시간을 제외 한 것(b 그림)과 정상적인 열응답 시험(c 그림)을 한 4 지역의 결과를 보여주고 있다.

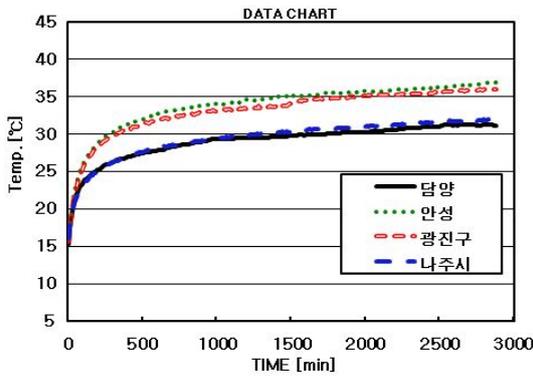
그림에서 보는 바와 같이 정전 또는 일시적인



(a) 부하변동포함



(b) 부하변동시간 제외



(c) 정상상태

그림 2. 열응답시험 결과

고장에 의해 부하 변동이 발생할 경우 부하 변동 발생 직전 온도까지 회복하기 위해서 많은 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 하지만 현지 지중열전도도 측정 과정에서 부하변동이

예기치 못하게 발생 할 수 있는 요소들은 언제든지 상존하고 있다. 그러므로 이에 대한 해석결과는 공사 일정 진행에 상당한 변화를 줄 수 있는 것으로 판단된다.

4. 선형열원법에 의한 k 값 비교

선형열원법인 식 (10)에 의하여 그림 2의 (b) 부하변동 시간을 제외한 경우와 그림 2의 (c) 부하변동이 발생하지 않은 정상상태 열응답 시험의 경우에서 초기 12시간을 제외한 후 k 값을 산출하여 표 3과 같이 나타내었다.

표 3. 선형 열원법에 의해 산출한 k 값

구분	부하변동 발생시 k ($W/m \cdot K$)	정상상태 k ($W/m \cdot K$)	차이 (정상-변동시) Δk ($W/m \cdot K$)
담양	2.91	3.07	-0.16
안성	2.25	2.33	-0.08
광진구	2.22	2.23	-0.01
나주시	2.37	2.45	-0.08

표 3에서 보는바와 같이 부하 변동시간을 제외한 경우와 부하변동이 발생하지 않은 정상상태에서의 k 값을 비교할 때 정상 상태의 k 값이 부하변동 시간을 제외한 경우의 k 값 보다 $0.01 \sim 0.16 W/m \cdot K$ 큰 것으로 나타났다. 하지만 그 차이가 크지 않아 지중열 교환기 설계 시 영향을 미칠 수 있는 범위는 아주 작을 것으로 사료된다. 따라서 예상치 못한 부하 변동이 발생 하였을 경우 그 상태에서 열응답 시험을 중단하기 보다는 부하변동 발생 직전 온도까지 회복한 후 계속해서 열응답 시험을 진행하는 것도 검토할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

5. 선형열원법에 의한 R_b 값 비교

선형열원법인 식 (10)에 의하여 k 값을 산출

한 후에는 식 (11)에 의하여 R_b 를 산출 할 수 있다. 식 (11)을 주의 깊게 살펴보면 R_b 와 k 는 상호 보완의 관계에 있음을 알 수 있다.

표 4는 식 (11)에 의하여 그림 2의 (b) 부하변동 시간을 제외한 경우와 그림 2의 (c) 부하변동이 발생하지 않은 정상상태 열응답 시험의 경우에서 초기 12시간을 제외한 후 R_b 값을 산출하여 나타내었다.

표 4. 선형 열원법에 의해 산출한 R_b 값

구분	부하변동 발생시 R_b ($m \cdot K/W$)	정상상태 R_b ($m \cdot K/W$)	차이 (정상-변동시) ΔR_b ($m \cdot K/W$)
담양	0.081	0.085	0.004
안성	0.140	0.136	-0.004
광진구	0.115	0.112	-0.003
나주시	0.063	0.070	0.007

표 4에서 보는바와 같이 부하 변동시간을 제외한 경우와 부하변동이 발생하지 않은 정상상태 열응답 시험에서의 R_b 값을 비교할 때 k 값 경우와는 다르게 정상 상태의 R_b 값이 부하변동 시간을 제외한 경우의 R_b 값 보다 모두가 큰 것이 아니라 -0.004 $m \cdot K/W$ 작은 것으로 부터 +0.007 $m \cdot K/W$ 큰 것 까지 경우에 따라 다르게 나타났다. 그러므로 차이가 일정한 경향을 나타내지 않음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 식 (11)에서 기울기 b와 절편 c 값 변화의 상대성에 따라 나타나는 것으로 판단된다.

6. 부하변동 발생 시점에 따른 k 값, R_b 값 변화율

표 5에서는 부하변동이 발생한 시점에 따른 k 값, R_b 값 변화율을 나타내었다.

표 5에서 보는 것처럼 k 값의 변화율은 부하변동 시점을 20시간 이내와 20 시간 이후로 나누어 볼 때 부하변동이 일어난 시점이 열응답 시험 시작 시점으로부터 20시간 이내일 경우 k 값에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다.

표 5. 발생시점과 k 값, R_b 값 변화

발생 시점	온도차 (발생시점-종료시점) ($^{\circ}C$)	부하변동 지속시간 (h :min)	변화율 (%)	변화율 (%)
13h 44min	3.8	3 : 17	0.4	2.7
23h 55min	4.5	0 : 10	3.4	2.9
30h	8	1 : 30	5.2	4.7
31h 25min	3.7	0 : 2	3.2	10

★ 동일 보어홀에서의 부하 변동 발생 시점이 아니고 각 시험용 보어홀 에서 발생한 시점임.

한편, R_b 값의 변화율은 열응답 시작 시점 으로부터 부하 변동 발생시점이 가까울수록 변화율이 작고 부하변동 발생시점이 늦어질수록 변화율이 점차적으로 증가되었다.

이러한 이유는 열응답 시험 시간이 많아 질수록 온도도 상승되어 이 시점에서 부하변동이 발생 할 경우 부하변동 지속시간에 비해 상대적으로 온도가 빠르게 하강함으로써 기울기 변화에 미치는 영향도 증가하기 때문인 것으로 사료되며, 지중 열교환기 설계에 미치는 영향 또한 커질 것으로 예상된다.

7. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 부하변동 발생 시 부하변동 발생 직전의 온도까지 회복하는데 소요되는 시간은 부하변동 지속 시간과 무관하게 4시간 이상 소요되는 것으로 나타났다.

- (2) 일시적인 부하 변동이 발생한 경우 열 응답 시험의 k 값은 정상상태 열응답 시험 k 값 보다 $0.01 \sim 0.16 W/m \cdot K$ 작은 것으로 나타나 지중열교환기 설계에 미치는 영향도 작을 것으로 사료된다.
- (3) 일시적인 부하 변동이 발생한 경우 열 응답 시험의 R_b 값은 정상상태 열응답 시험의 R_b 값과 비교하면 정상상태 보다 $-0.004 m \cdot K/W$ 작은 것으로 부터 $+0.007 m \cdot K/W$ 큰 것 까지 경우에 따라 다르게 나타났다.
- (4) k 값과 R_b 값의 변화율은 부하변동 발생 시점이 열응답 시험 시작 시점과 가까울수록 적고 부하변동 시점이 늦어질수록 변화율이 큰 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Eskilson, P., Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Dept. of Math. Physics, University of Lund, Sweden, 1987.
2. Adam Austin, Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties, Degree of Master of Science OSU., 1995
3. Signhild Geglín & Bo Nordell, Thermal Response Tests of Boreholes-Results From In Situ Measurements, The Second Stockton International Conference March 16-17, 1998
4. Smith, Marvin, "Comments on in-situ borehole thermal conductivity testing", The Source 1-2/99, Stillwater, OK, 1999.
5. Hellstrom G. and Sanner B., PC-programs for Borehole Heat Exchanger Design, Asterweg 2, D-35633, Lahnau, Germany, 2000.
6. Kavanaugh, S.P., Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Fields Tests, ASHRAE 1118-TRP. 2000.
7. Nina Mattsson, Gilbert Steimmann and Lyesse Laloui, In-Situ Thermal Response Testing- New Developments, Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007
8. 이세균, 우정선, 김대기, 지중유효열전도율 해석에 사용되는 선형열원모델의 초기제외시간 결정에 관한 연구, 에너지공학, 제 17권, 제3호, pp. 167-174, 2008.
9. 한국에너지기술연구원, 현지 지중열전도도 측정기술, 지식경제부, 2008.
10. 이세균, 우정선, 노정근, 선형열원법에 의한 지중 유효열전도도와 보어홀 전열저항 해석, 한국태양에너지학회논문집, Vol. 30, No. 4, pp. 71~78. 2010.
11. 지식경제부, 에너지관리공단, 신재생에너지센터, 신.재생에너지 설비의 지원등에 관한 기준 및 지침, pp. 117-121. 2011.
12. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.